



1950-1951 1952-1953 1954-1955 1956-1957 1958-1959 1960-1961 1962-1963 1964-1965 1966-1967 1968-1969 1970-1971 1972-1973 1974-1975 1976-1977 1978-1979 1980-1981 1982-1983 1984-1985 1986-1987 1988-1989 1990-1991 1992-1993 1994-1995 1996-1997 1998-1999 2000-2001 2002-2003 2004-2005 2006-2007 2008-2009 2010-2011 2012-2013 2014-2015 2016-2017 2018-2019 2020-2021 2022-2023 2024-2025 2026-2027 2028-2029 2030-2031 2032-2033 2034-2035 2036-2037 2038-2039 2040-2041 2042-2043 2044-2045 2046-2047 2048-2049 2050-2051 2052-2053 2054-2055 2056-2057 2058-2059 2060-2061 2062-2063 2064-2065 2066-2067 2068-2069 2070-2071 2072-2073 2074-2075 2076-2077 2078-2079 2080-2081 2082-2083 2084-2085 2086-2087 2088-2089 2090-2091 2092-2093 2094-2095 2096-2097 2098-2099 2100-2101 2102-2103 2104-2105 2106-2107 2108-2109 2110-2111 2112-2113 2114-2115 2116-2117 2118-2119 2120-2121 2122-2123 2124-2125 2126-2127 2128-2129 2130-2131 2132-2133 2134-2135 2136-2137 2138-2139 2140-2141 2142-2143 2144-2145 2146-2147 2148-2149 2150-2151 2152-2153 2154-2155 2156-2157 2158-2159 2160-2161 2162-2163 2164-2165 2166-2167 2168-2169 2170-2171 2172-2173 2174-2175 2176-2177 2178-2179 2180-2181 2182-2183 2184-2185 2186-2187 2188-2189 2190-2191 2192-2193 2194-2195 2196-2197 2198-2199 2200-2201 2202-2203 2204-2205 2206-2207 2208-2209 2210-2211 2212-2213 2214-2215 2216-2217 2218-2219 2220-2221 2222-2223 2224-2225 2226-2227 2228-2229 2230-2231 2232-2233 2234-2235 2236-2237 2238-2239 2240-2241 2242-2243 2244-2245 2246-2247 2248-2249 2250-2251 2252-2253 2254-2255 2256-2257 2258-2259 2260-2261 2262-2263 2264-2265 2266-2267 2268-2269 2270-2271 2272-2273 2274-2275 2276-2277 2278-2279 2280-2281 2282-2283 2284-2285 2286-2287 2288-2289 2290-2291 2292-2293 2294-2295 2296-2297 2298-2299 2300-2301 2302-2303 2304-2305 2306-2307 2308-2309 2310-2311 2312-2313 2314-2315 2316-2317 2318-2319 2320-2321 2322-2323 2324-2325 2326-2327 2328-2329 2330-2331 2332-2333 2334-2335 2336-2337 2338-2339 2340-2341 2342-2343 2344-2345 2346-2347 2348-2349 2350-2351 2352-2353 2354-2355 2356-2357 2358-2359 2360-2361 2362-2363 2364-2365 2366-2367 2368-2369 2370-2371 2372-2373 2374-2375 2376-2377 2378-2379 2380-2381 2382-2383 2384-2385 2386-2387 2388-2389 2390-2391 2392-2393 2394-2395 2396-2397 2398-2399 2400-2401 2402-2403 2404-2405 2406-2407 2408-2409 2410-2411 2412-2413 2414-2415 2416-2417 2418-2419 2420-2421 2422-2423 2424-2425 2426-2427 2428-2429 2430-2431 2432-2433 2434-2435 2436-2437 2438-2439 2440-2441 2442-2443 2444-2445 2446-2447 2448-2449 2450-2451 2452-2453 2454-2455 2456-2457 2458-2459 2460-2461 2462-2463 2464-2465 2466-2467 2468-2469 2470-2471 2472-2473 2474-2475 2476-2477 2478-2479 2480-2481 2482-2483 2484-2485 2486-2487 2488-2489 2490-2491 2492-2493 2494-2495 2496-2497 2498-2499 2500-2501 2502-2503 2504-2505 2506-2507 2508-2509 2510-2511 2512-2513 2514-2515 2516-2517 2518-2519 2520-2521 2522-2523 2524-2525 2526-2527 2528-2529 2530-2531 2532-2533 2534-2535 2536-2537 2538-2539 2540-2541 2542-2543 2544-2545 2546-2547 2548-2549 2550-2551 2552-2553 2554-2555 2556-2557 2558-2559 2560-2561 2562-2563 2564-2565 2566-2567 2568-2569 2570-2571 2572-2573 2574-2575 2576-2577 2578-2579 2580-2581 2582-2583 2584-2585 2586-2587 2588-2589 2590-2591 2592-2593 2594-2595 2596-2597 2598-2599 2600-2601 2602-2603 2604-2605 2606-2607 2608-2609 2610-2611 2612-2613 2614-2615 2616-2617 2618-2619 2620-2621 2622-2623 2624-2625 2626-2627 2628-2629 2630-2631 2632-2633 2634-2635 2636-2637 2638-2639 2640-2641 2642-2643 2644-2645 2646-2647 2648-2649 2650-2651 2652-2653 2654-2655 2656-2657 2658-2659 2660-2661 2662-2663 2664-2665 2666-2667 2668-2669 2670-2671 2672-2673 2674-2675 2676-2677 2678-2679 2680-2681 2682-2683 2684-2685 2686-2687 2688-2689 2690-2691 2692-2693 2694-2695 2696-2697 2698-2699 2700-2701 2702-2703 2704-2705 2706-2707 2708-2709 2710-2711 2712-2713 2714-2715 2716-2717 2718-2719 2720-2721 2722-2723 2724-2725 2726-2727 2728-2729 2730-2731 2732-2733 2734-2735 2736-2737 2738-2739 2740-2741 2742-2743 2744-2745 2746-2747 2748-2749 2750-2751 2752-2753 2754-2755 2756-2757 2758-2759 2760-2761 2762-2763 2764-2765 2766-2767 2768

P1999,0003 P

## Description

Optical semiconductor device with multiple quantum well structure

5 The invention relates to an optical semiconductor device with a multiple quantum well structure, in which well layers and barrier layers comprising various types of semiconductor layers are alternately layered.

10

94 A device of this type is known for example from EP 0 666 624 B1 or from Journal of Crystal Growth 189/190 (1998) pages 786-789.

15 The high quantum efficiency of indium-gallium-nitride (InGaN)-based LEDs and laser diodes is caused by the self-organized growth of indium-rich islands in the active quantum well. As a result, the injected charge carriers are spatially localized at these islands and  
20 are prevented from non-radiating recombination at lattice defects.

The nucleation of these quantum dots must be initiated by suitable buffer layers. In particular, indium-  
25 containing structures are suitable before the actual active zone as a buffer layer. Indium-containing nitridic semiconductors ( $\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{In}_{1-(x+y)}\text{N}$  semiconductors) have a tendency toward segregation and formation of indium-containing phases. This leads to varying strain  
30 fields at the growth surface, promoting the formation of indium-rich islands in the active quantum well. GaInN layers approximately 100 nm thick can be deposited before the active zone in order to improve the GaInN quantum dot nucleation.

35

Previously, an optimum efficiency could be achieved with, for example, 2- to 10-fold quantum well structures. As can be shown experimentally, the emitted photons are generated exclusively in the two

uppermost quantum wells (i.e. those closest to the p side). A suitable choice of growth parameters achieves the effect that the emission takes place exclusively in the uppermost of the quantum wells. The lower quantum wells serve for improving the nucleation of the GaInN islands in the uppermost quantum well. Dispensing with them causes the optical output power to be reduced by over 50%. However, these quantum wells lead to a considerable increase in the forward voltage. The forward voltage can be improved by reducing the number of wells at the expense of the quantum efficiency. The piezo fields, which lead to the observed increase in the forward voltage, can be compensated by high doping levels in the quantum well region. However, this adversely effects the crystal quality of the active layer or impairs the injection behavior and consequently reduces the internal quantum efficiency.

a6 The invention is based on the object of improving in this respect an optical semiconductor device of the type stated at the beginning.

a7 The invention achieves this object by the features of patent claim 1.

a8 The invention provides a multiple quantum well structure with well layers and barrier layers comprising various types of semiconductor layers which are layered alternately one on top of the other, in which the well layers are thin layers of a first composition based on a nitride semiconductor material with a first electron energy and the barrier layers are layers which are thicker in comparison, of a second composition of a nitride semiconductor material with electron energy which is higher in comparison with the first electron energy. Acting as the radiation-active quantum well, seen in the direction of growth, is firstly one of the last quantum well layers or the last

98 quantum well layer. The well layers arranged in front, which essentially do not radiate, and the barrier layers form a superlattice for this last layer.

99  
5 In a particularly preferred development, in the superlattice, the well layers are thin aluminum-gallium-indium-nitride layers and the barrier layers are gallium-nitride layers which are thicker in comparison and the active quantum well has indium-gallium-nitride.  
10

15 Within at least one well layer of the superlattice, the In content preferably increases in the direction of growth, i.e. in the direction of the radiation-active quantum well layer. At the same time, the indium content remote from the radiation-active quantum well layer is preferably below 5%.

20 In a particularly preferred development, at least one of the well layers of the superlattice has at least one pair of single layers, of which the first single layer in the direction of growth has a lower indium content than the second single layer in the direction of growth. This well layer preferably has a plurality of  
25 single layers whose indium content increases step by step from the single layer lying furthest away from the radiation-active quantum well layer to the single layer lying closest to the radiation-active quantum well layer. It is particularly preferred for the steps of  
30 the increase in indium content to be smaller than 5%. It is also particularly preferred for the indium content of the single layer furthest away from the radiation-active quantum well layer to be less than 5%. The thickness of the single layers preferably lies in  
35 the range of just a few monolayers, particularly preferably approximately one monolayer.

a 11 The particular advantage of the step-by-step increase

911  
in the In content is that a potential profile resembling a delta potential is produced, in particular in the case where the thickness of the single layers does not significantly exceed that of a monolayer. The  
5 difference in the energy level in the barrier layers and the energy level obtained for one electron in the well layer is consequently not greater than in the case of a rectangular well layer with a significantly lower indium content as the uppermost single layer of the  
10 stepped well layer. This achieves the effect that the advantages of a reduced overall indium content are retained, but the strain is at the same time influenced by the high indium content of the last single layer in such a way that the nucleation of InGaN-rich phases is  
15 improved and, consequently, the quantum efficiency is increased.

A further advantage arises for the following reason: the epitaxial growth of indium-containing III-V  
20 semiconductors (for example InGaAs, InGaN) is made more difficult by the relatively great atom radius of the indium. With constant fluxes of the group III components, indium is therefore incorporated with a delay. The indium concentration increases during the  
25 growth and approaches an equilibrium value exponentially. During the enriching phase, a certain indium coverage is formed on the growth surface. Only when this coverage is achieved is a constant amount of indium incorporated into the crystal. If, however, too  
30 much indium is offered, the indium present on the surface forms metallic droplets, which reduce the quality of the deposited layers. In particular, however, such indium droplets produce shunts at the p-n junction, reducing not only the quantum efficiency but  
35 also the stability with respect to electrostatic discharging (ESD). These effects are reduced by initially depositing indium-containing layers with a low indium content, preferably less than 5%, then

increasing the indium content in subsequent layers. In the case of the active layer itself, the substructure is then already prepared by the well layers in such a way that InGaN compositions with a higher indium content can be deposited.

The nucleation of indium-rich phases is advantageously improved by the increasing indium content in the well layer or layers. The harmful formation of indium droplets is at least considerably reduced.

Further advantageous developments and refinements of the invention are the subject of subclaims.

The invention is explained in more detail below on the basis of an exemplary embodiment with the aid of the figures, in which:

figure 1a, b shows a schematic representation of the layer structure of a device according to the invention,

figure 2 shows a schematic representation of the quantum well structure of the device according to figure 1,

figure 3 shows a schematic representation of the quantum well structure of a customary type, and

figure 4 shows a schematic representation of the profile of the conduction band according to a particularly preferred embodiment of the invention.

According to figure 1a initially a buffer layer 3 of aluminum-gallium-nitride (AlGaN) is formed on a substrate 1 of silicon carbide (SiC), to which a first contact electrode 2 is connected. This is followed by a further layer 4 of aluminum-gallium-nitride. A further buffer layer 5 of silicon-doped gallium nitride

q15  
is arranged over the layer 4 and the quantum well structure 6a, b, still to be explained in more detail, is arranged over that, followed by the actual active layer 6c. Arranged over the active layer 6 is a further layer 7 of aluminum-gallium-nitride, which serves as an electron barrier. This layer 7 is preferably doped with magnesium. A further GaN layer, not designated, may be arranged between the layers 6 and 7. A gallium-nitride layer 8, on which a second contact electrode 9 of the device is provided, is arranged over the layer 7.

The right-hand side of the layer structure shows in a schematically indicated manner the band gap of the single layers between the valence band and the conduction band.

q16  
The buffer layer 3 functionally serves as a growth layer, which is required to allow the LED structure to grow on the silicon carbide substrate 1. The further aluminum-gallium-nitride layer 4 between the layers 3 and 5 has an aluminum content which changes in the direction of the gallium-nitride layer 5. The gallium-nitride layer 5 is preferably silicon-doped. The layer 7 of magnesium-doped aluminum-gallium-nitride arranged over the active layer 6 serves as an electron barrier.

q17  
This basic structure of figure 1a can be used as standard for gallium-aluminum-indium-nitride light-emitting diodes (LEDs).

Figure 1b is an enlarged representation of the active layer 6 according to the invention. The layer with the quantum well structure 6 is constructed by layers 6a of gallium-indium-nitride (GaInN) being arranged between individual gallium-nitride (GaN) layers 6b. The actually active, i.e. light-emitting, layer 6c of gallium-indium-nitride (GaInN) is followed by the

uppermost gallium-nitride layer 6b.

As can be seen, layers 6a and 6b of different thickness alternate. The thinner layers 6a of indium-gallium-nitride and the thicker layers 6b of gallium-nitride in this case form superlattices, in which the wells 6a are thin, i.e. thinner than 3 nm, and the layers 6b are 3 nm and above. The layers are produced by vapor-phase or molecular-beam epitaxy. In this case, a slow growth of 1-10 nm/min, preferably 1-2 nm/min, at low temperatures around 700°C is intended.

6 18  
The indium content lies below 24%, preferably however below 20%, and is therefore preferably reduced in comparison with customary indium contents. The layers 6a and 6b, depicted only once in the figure, may be arranged repeatedly one above the other, the structure preferably being repeated  $x=3$  times. The uppermost gallium-nitride layer 6b is followed by the actually active, i.e. illuminating, layer 6c of indium-gallium-nitride.

It may preferably be envisaged to dope the quantum well structure 6a, 6b with silicon in a concentration of  $10^{17}$  to  $10^{18}$   $\text{cm}^{-3}$ . This once again provides a significant improvement in comparison with an undoped structure.

Figure 2 shows the energy conditions for the valence band VB and the conduction band CB. The electron energy is plotted in the direction of the y-axis, the quantum wells with a width corresponding to the layer thickness are plotted in the direction of the x-axis. The uppermost gallium-nitride layer 6b is followed by the actually active layer 6c.

35  
Figure 3 shows by comparison the valence band with thicker quantum wells of gallium-indium-nitride than in the case of the invention. The effect of the



piezoelectric fields produced by the strains is indicated by the sloping lines.

019  
The use according to the invention of GaInN/GaN  
5 superlattices with thin wells (to a quantum well width of approximately 2 nm) in a layer structure according to figure 1 and with quantum well conditions according to figure 2 allows the forward voltage to be significantly lowered and, at the same time, the high  
10 internal quantum efficiency of the indium-gallium-nitride-based optical semiconductor device to be maintained. The piezo fields otherwise forming are avoided entirely or have virtually no effect any longer. In comparison with customary single quantum-  
15 well structures, in which no gallium-indium-nitride superlattice is deposited before the active well, the device structure according to the invention has twice the conversion efficiency.

20 Superlattices are understood as meaning generally a particularly periodic sequence of layers only a few atomic layers thick. The superlattice is separated from the active well by a GaN or AlGaN barrier ( $> 3$  nm). The silicon doping of the quantum well structure  
25 is significantly improved in comparison with the undoped structure.

In comparison with known superlattice structures, the device structure according to the invention has a  
30 forward voltage that is lowered by  $> 0.5$  V.

In comparison with SQW (Single Quantum Well) structures, in which no GaInN superlattice is deposited before its active quantum well, it has been possible to  
35 double the conversion efficiency.

The combination of thin, and low-indium-content, optically inactive quantum wells ("pre-wells") with an

active quantum well 6c allows the emission behavior of the previously known multiple quantum well structures to be maintained and the forward voltage to be lowered. The thin GaInN quantum wells improve the quality of the active quantum well, while the low layer thickness of the "pre-wells" and their low indium content have the effect of reducing the formation of disturbing piezo fields. The forward voltage is therefore not increased by this nucleation layer in comparison with a SQW structure.

Figure 4 shows the profile of the conduction band in an InGaN well layer 6a between two GaN barrier layers, the GaN barrier layer 6a comprising a total of 4 single layers 60a to 63a. The indium content increases step by step from the single layer 60a lying furthest away from the radiation-active quantum well layer 6c to the single layer 63a lying closest to the radiation-active quantum well layer 6c. The steps of the increase in the indium content are smaller than 5% and the indium content of the single layer 60a lying furthest away from the radiation-active quantum well layer 6c is less than 5%. The layer thickness of each of the single layers 60a to 63a lies in the range of just a few monolayers or corresponds approximately to one monolayer of the composition.

This produces a potential profile which is similar to a delta potential. Consequently, the difference between the energy level in the barrier layers and the energy level obtained for an electron in the stepped well layer is no greater than in the case of a rectangular well layer (represented on the right-hand side in the figure) with a much lower indium content than the uppermost single layer of the stepped well layer. This achieves the effect that the advantages of a reduced overall indium content are maintained, but at the same time the strain is influenced by the high indium

content of the last single layer in such a way that the nucleation of InGaN-rich phases is improved, and consequently the quantum efficiency is increased.

- 5 The description of the invention on the basis of the above exemplary embodiment is of course not to be understood as a restriction of the invention to this embodiment. Rather, the invention also relates to devices in other material systems in which similar
- 10 problems are to be solved.

3/PRTS

09/913394

1

## Beschreibung

Optische Halbleitervorrichtung mit Mehrfach-Quantentopf-Struktur

5

Die Erfindung betrifft eine optische Halbleitervorrichtung mit Mehrfach-Quantentopf-Struktur, in der Topfschichten und Barrierschichten aus verschiedenen Arten von Halbleiterschichten abwechselnd geschichtet sind.

10

Eine derartige Vorrichtung ist beispielsweise aus der EP 0 666 624 B1 oder aus Journal of Crystal Growth 189/190 (1998) p. 786-789 bekannt.

15 Der hohe Quantenwirkungsgrad von Indium-Gallium-Nitrid-(InGaN-)-basierten LEDs und Laserdioden wird durch das selbstorganisierte Wachstum indiumreicher Inseln im aktiven Quantentrog oder Quantentopf verursacht. Dadurch werden die injizierten Ladungsträger räumlich an diesen Inseln lokalisiert und von nichtstrahlender Rekombination an Gitterdefekten abgehalten.

Die Nukleation dieser Quantenpunkte muß durch geeignete Pufferschichten eingeleitet werden. Insbesondere eignen sich indiumhaltige Strukturen vor der eigentlichen aktiven Zone als Pufferschicht. Indiumhaltige nitridische Halbleiter (Ga<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>In<sub>1-(x+y)</sub>N-Halbleiter) neigen zur Entmischung und Bildung von indiumhaltigen Phasen. Dies führt an der Wachstumsoberfläche zu variierenden Verspannungsfeldern, die die Bildung indiumreicher Inseln im aktiven Quantentrog begünstigt. Ca. 100 nm dicke GaInN-Schichten können vor der aktiven Zone abgeschieden werden, um die GaInN-Quantenpunkt-Nukleation zu verbessern.

25  
30

Bisher kann ein optimaler Wirkungsgrad mit z. B. 2- bis 10-fach-Quantentopf-Strukturen erreicht werden. Wie experimentell gezeigt werden kann, werden die emittierten Photonen ausschließlich in den beiden obersten (d.h. der p-Seite nächsten) Quantentrögen erzeugt. Bei geeigneter Wahl der Wachstumsparameter wird erreicht, daß die Emission ausschließlich im obersten der Quantentöpfe erfolgt. Die unteren Quantentöpfe dienen zur Verbesserung der Nukleation der GaInN-Inseln im obersten Quantentopf. Wird auf sie verzichtet, so sinkt die optische Ausgangsleistung um über 50 % ab. Allerdings führen diese Quantentöpfe zu einer erheblichen Erhöhung der Flußspannung. Die Flußspannung kann durch Verringern der Topfanzahl auf Kosten der Quanteneffizienz verbessert werden. Die Piezofelder, die zur beobachteten Erhöhung der Flußspannung führen, können durch hohe Dotierniveaus im Quantentopfbereich kompensiert werden. Dadurch wird allerdings die Kristallqualität der aktiven Schicht gestört bzw. das Injektionsverhalten verschlechtert und so die interne Quanteneffizienz verringert.

20

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine optische Halbleitervorrichtung der eingangs genannten Art demgegenüber zu verbessern.

25 Diese Aufgabe löst die Erfindung mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1.

Erfindungsgemäß ist eine Mehrfach-Quantentopf-Struktur mit Topfschichten und Barrierschichten aus verschiedenen Arten von Halbleiterschichten, die abwechselnd aufeinander geschichtet sind, vorgesehen, in der die Topfschichten dünne Schichten einer ersten Zusammensetzung auf der Basis eines Nitrid-Halbleitermaterials mit einer ersten Elektronenenergie

30

und die Barriereschichten demgegenüber dickere Schichten einer zweiten Zusammensetzung eines Nitrid-Halbleitermaterials mit gegenüber der ersten Elektronenenergie höheren Elektronenenergie sind. Als strahlungsaktiver Quantentopf wirkt, in  
5 Aufwuchsrichtung gesehen, erst eine der letzten Quantentopfschichten oder die letzte Quantentopfschicht. Für diese bilden die vorgeordneten Topfschichten, die im Wesentlichen nicht strahlen, und die Barriereschichten ein Übergitter aus.

10 Bei einer besonders bevorzugten Weiterbildung sind im Übergitter die Topfschichten dünne Aluminium-Gallium-Indium-Nitrid-Schichten und die Barriereschichten demgegenüber dickere Gallium-Nitrid-Schichten und weist der aktive Quantentopf Indium-Gallium-Nitrid auf.

15

Bevorzugt nimmt innerhalb mindestens einer Topfschicht des Übergitters der In-Gehalt in Aufwuchsrichtung, d. h. in Richtung zur strahlungsaktiven Quantentopfschicht hin, zu. Vorzugsweise liegt hierbei der Indium-Gehalt entfernt von der  
20 strahlungsaktiven Quantentopfschicht unterhalb 5%.

Bei einer besonders bevorzugten Weiterbildung weist mindestens eine der Topfschichten des Übergitters mindestens ein Einzelschichtenpaar auf, von dem die in Aufwuchsrichtung erste Einzelschicht einen geringeren Indium-Gehalt aufweist als  
25 die in Aufwuchsrichtung zweite Einzelschicht. Vorzugsweise weist diese Topfschicht eine Mehrzahl von Einzelschichten auf, deren Indium-Gehalt ausgehend von der am weitesten entfernt von der strahlungsaktiven Quantentopfschicht liegenden  
30 Einzelschicht zur zu der strahlungsaktiven Quantentopfschicht nächstliegenden Einzelschicht hin stufenweise zunimmt. Die Stufen der Zunahme des Indium-Gehalts sind besonders bevorzugt kleiner 5%. Weiterhin besonders bevorzugt ist der In-

dium-Gehalt der am weitesten entfernt von der strahlungsaktiven Quantentopfschicht liegenden Einzelschicht kleiner als 5%. Vorteilhafterweise liegt die Dicke der Einzelschichten im Bereich weniger Monolagen besonders bevorzugt etwa eine Monolage.

Der besondere Vorteil der stufenweisen Zunahme des In-Gehalts besteht darin, daß ein Potentialverlauf entsteht, der einem Dreieckspotential ähnlich ist, insbesondere für den Fall, dass die Dicke der Einzelschichten die einer Monolage nicht wesentlich übersteigt. Folglich ist der Unterschied des Energieniveaus in den Barrierschichten und dem sich für ein Elektron ergebenden Energieniveau in der Topfschicht nicht größer als bei einer rechteckigen Topfschicht mit wesentlich geringerem Indium-Gehalt als die oberste Einzelschicht der gestuften Topfschicht. Dadurch wird erreicht, dass die Vorteile eines reduzierten Gesamt-Indium-Gehalts beibehalten werden, aber gleichzeitig durch den hohen Indium-Gehalt der letzten Einzelschicht die Verspannung so beeinflusst wird, dass die Nukleation von InGaN-reichen Phasen verbessert und somit die Quanteneffizienz gesteigert wird.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus folgendem: Das epitaktische Wachstum von Indium-haltigen III-V-Halbleitern (z. B. InGaAs, InGaN) wird durch den relativ großen Atomradius des Indiums erschwert. Bei konstanten Flüssen der Gruppe III-Komponenten baut sich Indium daher verzögert ein. Die Indium-Konzentration steigt während des Wachstums an und nähert sich exponentiell einem Gleichgewichtswert an. Während der Anreicherungsphase bildet sich auf der Wachstumsoberfläche eine bestimmte Indium-Bedeckung. Erst wenn diese Bedeckung erreicht ist, wird gleichbleibend viel Indium in den Kristall eingebaut. Wird allerdings zu viel Indium angeboten, formt das auf

der Oberfläche vorhandene Indium metallische Tröpfchen, die die Qualität der abgeschiedenen Schichten vermindern. Vor allem aber erzeugen solche Indium-Tröpfchen am p-n-Übergang Nebenschlüsse, die neben der Quanteneffizienz auch die Stabilität gegenüber elektrostatischer Entladung (ESD) vermindern. Diese Effekte werden dadurch vermindert, daß zunächst Indiumhaltige Schichten mit geringem Indium-Gehalt, bevorzugt weniger als 5%, abgeschieden werden, um dann bei darauffolgenden Schichten den Indiumgehalt zu steigern. Bei der aktiven Schicht selbst ist der Unterbau durch die Topfschichten dann schon derart vorbereitet, dass InGaN-Zusammensetzungen mit höherem Indium-Gehalt abgeschieden werden können.

Die Nukleation von Indium-reichen Phasen wird durch den sich erhöhenden Indium-Gehalt in der oder den Topfschichten vorteilhafterweise verbessert. Die schädliche Ausbildung von Indium-Tröpfchen wird zumindest erheblich vermindert.

Weitere vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand von Unteransprüchen.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels mit Hilfe der Figuren der Zeichnung näher erläutert.

Es zeigen:

Figur 1a,b eine schematische Darstellung des Schichtaufbaus einer Vorrichtung gemäß der Erfindung,  
Figur 2 eine schematische Darstellung der Quantentopfstruktur der Vorrichtung gemäß Figur 1,  
Figur 3 eine schematische Darstellung der Quantentopfstruktur üblicher Art, und



Figur 4 eine schematische Darstellung des Verlaufs des Leitungsbandes gemäß einer besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung.

5 Gemäß Figur 1a ist auf einem Substrat 1 aus Siliziumcarbid (SiC), an dem eine erste Kontakt-Elektrode 2 angeschlossen ist, zunächst eine Pufferschicht 3 aus Aluminium-Gallium-Nitrid (AlGa<sub>N</sub>) gebildet. Darüber schließt sich eine weitere Schicht 4 aus Aluminium-Gallium-Nitrid an. Über der Schicht 4  
10 sind eine weitere Pufferschicht 5 aus Silizium-dotiertem Galliumnitrid und darüber ist die noch näher zu erläuternde Quantentopf-Struktur 6a,b angeordnet, an die die eigentliche aktive Schicht 6c anschließt. Über der aktiven Schicht 6 ist eine weitere Schicht 7 aus Aluminium-Gallium-Nitrid angeordnet,  
15 net, die als Elektronenbarriere dient. Vorzugsweise ist diese Schicht 7 mit Magnesium dotiert. Zwischen den Schichten 6 und 7 kann eine weitere nicht gezeichnete GaN-Schicht angeordnet sein. Über der Schicht 7 ist eine Galliumnitrid-Schicht 8 angeordnet, auf der eine zweite Kontakt-Elektrode 9 der Vor-  
20 richtung vorgesehen ist.

Die rechte Seite des Schichtaufbaus zeigt schematisch angedeutet die Bandlücke der einzelnen Schichten zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband.

25

Funktionell dient die Pufferschicht 3 als Wachstumsschicht, die erforderlich ist, um auf dem Siliziumcarbid-Substrat 1 die LED-Struktur aufwachsen zu können. Die weitere Aluminium-Gallium-Nitrid-Schicht 4 zwischen den Schichten 3 und 5 hat  
30 einen sich in Richtung der Gallium-Nitrid-Schicht 5 hin ändernden Aluminiumgehalt. Die Gallium-Nitrid-Schicht 5 ist vorzugsweise siliziumdotiert. Die über der aktiven Schicht 6

angeordnete Schicht 7 aus magnesisumdotiertem Aluminium-Gallium-Nitrid dient als Elektronenbarriere.

Dieser grundsätzlicher Aufbau der Figur 1a kann standardmäßig  
5 für Gallium-Aluminium-Indium-Nitrid (LEDs) verwendet werden.

Figur 1b ist eine vergrößerte Darstellung der aktiven Schicht  
6 gemäß der Erfindung. Die Schicht mit der Quantentopf-Struktur  
6 ist aufgebaut, indem zwischen einzelnen Gallium-Nitrid-  
10 (GaN-)Schichten 6b Schichten 6a aus Gallium-Indium-Nitrid  
(GaInN) angeordnet sind. Die eigentlich aktive, d.h. lichtab-  
strahlende Schicht 6c aus Gallium-Indium-Nitrid (GaInN)  
schließt sich an die oberste Gallium-Nitrid-Schicht 6b an.

15 Wie ersichtlich, wechseln sich unterschiedlich dicke Schichten  
6a und 6b ab. Die dünneren Schichten 6a aus Indium-Gallium-  
Nitrid und die dickeren Schichten 6b aus Gallium-Nitrid  
bilden dabei Übergitter, bei denen die Töpfe 6a dünn sind, d.  
h. dünner als 3 nm und die Schichten 6b 3nm und darüber. Die  
20 Herstellung der Schichten erfolgt durch Gasphasen- oder Mole-  
kularstrahlepitaxie. Dabei ist ein langsames Wachstum von 1-10  
nm/min, bevorzugt 1-2nm/min, bei niedrigen Temperaturen um  
700 C° vorgesehen.

25 Der Indiumgehalt liegt unter 24%, vorzugsweise jedoch unter  
20 % und ist deshalb vorzugsweise gegenüber üblichen Indium-  
gehalten reduziert. Die in der Figur nur einmal gezeichneten  
Schichten 6a und 6b können mehrmals übereinander angeordnet  
sein, vorzugsweise wiederholt sich die Struktur x=3mal. An  
30 die oberste Gallium-Nitrid-Schicht 6b schließt sich die ei-  
gentlich aktive, d. h. leuchtende Schicht 6c aus Indium-Gal-  
lium-Nitrid an.

Vorzugsweise kann vorgesehen sein, die Quantentopfstruktur 6a, 6b mit Silizium in der Konzentration  $10^{17}$  bis  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  zu dotieren. Damit ergibt sich noch einmal eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu einer undotierten Struktur.

5

Figur 2 zeigt die Energieverhältnisse für das Valenzband VB und das Leitungsband CB. In Ordinatenrichtung ist die Elektronenenergie aufgetragen, in Abszissenrichtung sind die Quantentöpfe mit einer Breite, die der Schichtdicke entsprechen, aufgetragen. An die oberste Gallium-Nitrid-Schicht 6b schließt sich die tatsächlich aktive Schicht 6c an.

Figur 3 zeigt demgegenüber das Valenzband mit dickeren Quantentöpfen aus Gallium-Indium-Nitrid als bei der Erfindung. Durch die Schrägen angedeutet, ist der Effekt der piezoelektrischen Felder, die sich durch die Verspannungen ergeben.

Durch die erfindungsgemäße Verwendung von GaInN/GaN-Übergittern mit dünnen Töpfen (bis ca. 2 nm Quantentopfbreite) bei einem Schichtaufbau gemäß Figur 1 und Quantentopf-Verhältnissen gemäß Figur 2 kann die Flußspannung deutlich gesenkt werden und dabei die hohe interne Quanteneffizienz der Indium-Gallium-Nitrid-basierten optischen Halbleitervorrichtung erhalten werden. Die sich sonst ausbildenden Piezofelder werden ganz vermieden oder wirken sich praktisch nicht mehr aus. Im Vergleich zu herkömmlichen Einfach-Quantentopf-Strukturen, bei denen vor dem aktiven Topf kein Gallium-Indium-Nitrid-Übergitter abgeschieden wird, zeigt der erfindungsgemäße Vorrichtungsaufbau einen verdoppelten Konversionswirkungsgrad.

30

Unter Übergitter versteht man allgemein eine insbesondere periodische Aufeinanderfolge von nur wenigen Atomlagen dicken Schichten. Das Übergitter wird vom aktiven Trog durch eine

GaN- oder AlGaN-Barriere getrennt ( $>3\text{nm}$ ). Die Silizium-Dotierung der Quantentopfstruktur ist deutlich verbessert im Vergleich zur undotierten Struktur.

- 5 Im Vergleich mit bekannten Übergitterstrukturen hat der erfindungsgemäße Vorrichtungsaufbau eine um  $>0,5\text{V}$  gesenkte Flußspannung.

10 Im Vergleich zu SQW(Single Quantum Well)-Strukturen, vor deren aktivem Quantentopf kein GaInN Übergitter abgeschieden wurden, konnte der Konversionswirkungsgrad verdoppelt werden.

Durch die Kombination von dünnen, auch indiumarmen, optisch inaktiven Quantentrögen („Pre-Wells“) mit einem aktiven Quantentopf 6c kann das Emissionsverhalten der bisher bekannten Mehrfach-Quantentopf-Strukturen erhalten und die Flußspannung gesenkt werden. Die dünnen GaInN-Quantentöpfe verbessern die Qualität des aktiven Quantentopfs, während durch die geringe Schichtdicke der „Pre-Wells“ und ihrem niedrigen Indiumgehalt 20 die Ausbildung von störenden Piezofeldern verringert wird. Die Flußspannung wird daher durch diese Nukleationsschicht gegenüber einer SQW-Struktur nicht erhöht.

Die Figur 4 zeigt den Verlauf des Leitungsbandes in einer 25 InGaN-Topfschicht 6a zwischen zwei GaN-Barriereschichten, wobei die GaN-Topfschicht 6a aus insgesamt 4 Einzelschichten 60a bis 63a besteht. Der Indium-Gehalt nimmt ausgehend von der am weitesten entfernt von einer strahlungsaktiven Quantentopfschicht 6c liegenden Einzelschicht 60a zur zu der strahlungsaktiven Quantentopfschicht 6c nächstliegenden Einzelschicht 63a hin stufenweise zu. Die Stufen der Zunahme des Indium-Gehalts sind kleiner 5% und der Indium-Gehalt der am weitesten entfernt von der strahlungsaktiven Quantentopf-

30

schicht 6c liegenden Einzelschicht 60a ist kleiner als 5%. Die Schichtdicke jeder der Einzelschichten 60a bis 63a liegt im Bereich weniger Monolagen oder entspricht etwa einer Monolage der Zusammensetzung.

5

Dadurch entsteht ein Potentialverlauf, der einem Dreieckspotential ähnlich ist. Folglich ist der Unterschied des Energieniveaus in den Barriereschichten und dem sich für ein Elektron ergebenden Energieniveau in der gestuften Topf-

10 schicht nicht größer als bei einer rechteckigen Topfschicht (in der Figur auf der rechten Seite dargestellt) mit wesentlich geringerem Indium-Gehalt als die oberste Einzelschicht der gestuften Topfschicht. Dadurch wird erreicht, dass die Vorteile eines reduzierten Gesamt-Indium-Gehalts beibehalten  
15 werden, aber gleichzeitig durch den hohen Indium-Gehalt der letzten Einzelschicht die Verspannung so beeinflusst wird, dass die Nukleation von InGaN-reichen Phasen verbessert und somit die Quanteneffizienz gesteigert wird.

20 Die Beschreibung der Erfindung anhand des obigen Ausführungsbeispiels ist selbstverständlich nicht als Beschränkung der Erfindung hierauf zu verstehen. Die Erfindung bezieht sich vielmehr auch auf Vorrichtungen in anderen Materialsysteme, in denen gleichgelagerte Probleme zu lösen sind.

## Patentansprüche

1. Optische Halbleitervorrichtung mit einer Mehrfach-Quantentopf-Struktur, in der Topfschichten und Barriereschichten  
5 aus verschiedenen Arten von Halbleiterschichten abwechselnd  
aufeinander geschichtet sind, wobei  
Topfschichten (6a) einer ersten Zusammensetzung auf der Basis  
eines Nitrid-Halbleitermaterials mit einer ersten Elektro-  
nenenergie und Barriereschichten (6b) einer zweiten Zusammen-  
10 setzung eines Nitrid-Halbleitermaterials mit gegenüber der  
ersten Elektronenenergie höheren Elektronenenergie vorgesehen  
sind, denen in Aufwachsrichtung gesehen eine strahlungsaktive  
Quantentopfschicht (6c) nachgeordnet ist, für <sup>die?</sup>den die vorge-  
ordneten im Wesentlichen nicht strahlenden Topfschichten (6a)  
15 und die Barriereschichten (6b) ein Übergitter bilden.
2. Optische Halbleitervorrichtung nach Patentanspruch 1, bei  
der die Topfschichten (6a) dünne Aluminium-Indium-Gallium-Ni-  
trid-Schichten und die Barriereschichten (6b) demgegenüber  
20 dickere Gallium-Nitrid- oder Aluminium-Gallium-Nitrid-Schich-  
ten sind und der strahlungsaktive Quantentopf (6c) eine In-  
dium-Gallium-Nitrid-Schicht ist.
3. Optische Halbleitervorrichtung nach Patentanspruch 1 oder  
25 2, bei der sich der strahlungsaktive Quantentopf (6c) an die  
oberste Barriereschicht (6b) anschließt.
4. Optische Halbleitervorrichtung nach einem der Patentan-  
sprüche 1 bis 3, bei der die Schichtdicke des strahlungsakti-  
30 ven Quantentopfs (6c) größer ist als die Schichtdicke der  
Topfschichten (6a) des Übergitters.

5. Optische Halbleitervorrichtung nach einem der Patentansprüche 1 bis 4, bei der die Topfschichten (6a) dünner als 2nm sind und die Barrierschichten (6b) 3nm-dick oder dicker sind.

5

6. Optische Halbleitervorrichtung nach einem der Patentansprüche 2 bis 5, bei der die Topf- und Barrierschichten (6a, 6b) mit Silizium dotiert sind.

10 7. Optische Halbleitervorrichtung nach Patentanspruch 6, bei der die Dotierstoffkonzentration von  $10^{17}$  bis  $10^{18}\text{cm}^{-3}$  ist.

8. Optische Halbleitervorrichtung nach einem der Patentansprüche 1 bis 7, bei der innerhalb mindestens einer Topfschicht (6a) des Übergitters der In-Gehalt in Aufwachsrichtung, d. h. in Richtung zur strahlungsaktiven Quantentopfschicht (6c) hin, zunimmt.

9. Optische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 8, bei der in der Topfschicht (6a) der Indium-Gehalt entfernt von der strahlungsaktiven Quantentopfschicht unterhalb 5% liegt.

10. Optische Halbleitervorrichtung nach einem der Patentansprüche 1 bis 7, bei der mindestens eine der Topfschichten (6a) des Übergitters mindestens ein Einzelschichtenpaar (60a, 61a) aufweist, von dem die in Aufwachsrichtung erste Einzelschicht (60a) einen geringeren Indium-Gehalt aufweist als die in Aufwachsrichtung zweite Einzelschicht (61a).

11. Optische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 10, bei der die zweite Einzelschicht (61a) einen um weniger als 5% höheren Indium-Gehalt aufweist als die erste Einzelschicht (60a).

12. Optische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 10 oder 11,  
bei der die Topfschicht eine Mehrzahl von Einzelschichten  
(60a,61a,62a,63a) aufweist, deren Indium-Gehalt ausgehend von  
der am weitesten entfernt von der strahlungsaktiven Quanten-  
5 topfschicht (6c) liegenden Einzelschicht (60a) zur zu der  
strahlungsaktiven Quantentopfschicht (6c) nächstliegenden  
Einzelschicht (63a) hin stufenweise zunimmt.

13. Optische Halbleitervorrichtung nach Anspruch 12, bei der  
10 die Stufen der Zunahme des Indiumgehalts kleiner 5% sind.

14. Optische Halbleitervorrichtung nach einem der Ansprüche  
10 bis 13, bei der der Indium-Gehalt der am weitesten ent-  
fernt von der strahlungsaktiven Quantentopfschicht (6c) lie-  
15 genden Einzelschicht (60a) kleiner als 5% ist.

15. Optische Halbleitervorrichtung nach einem der Ansprüche  
10 bis 14, bei der die Dicke jeder der Einzelschichten  
(60a,61a,62a,63a) im Bereich weniger Monolagen liegt oder  
20 etwa einer Monolage entspricht.



## Zusammenfassung

### Optische Halbleitervorrichtung mit Mehrfach-Quantentopf-Struktur

5

Optische Halbleitervorrichtung mit einer Mehrfach-Quantentopf-Struktur, in der Topfschichten und Barriereschichten aus verschiedenen Arten von Halbleiterschichten abwechselnd aufeinander geschichtet sind, wobei Topfschichten (6a) einer ersten Zusammensetzung auf der Basis eines Nitrid-Halbleitermaterials mit einer ersten Elektronenenergie und Barriereschichten (6b) einer zweiten Zusammensetzung eines Nitrid-Halbleitermaterials mit gegenüber der ersten Elektronenenergie höheren Elektronenenergie vorgesehen sind, denen in Aufwuchsrichtung gesehen eine strahlungsaktive Quantentopfschicht (6c) nachgeordnet ist, für den die vorgeordneten im Wesentlichen nicht strahlenden Topfschichten (6a) und die Barriereschichten (6b) ein Übergitter bilden.

10

15

20 Figur 1a und 1b

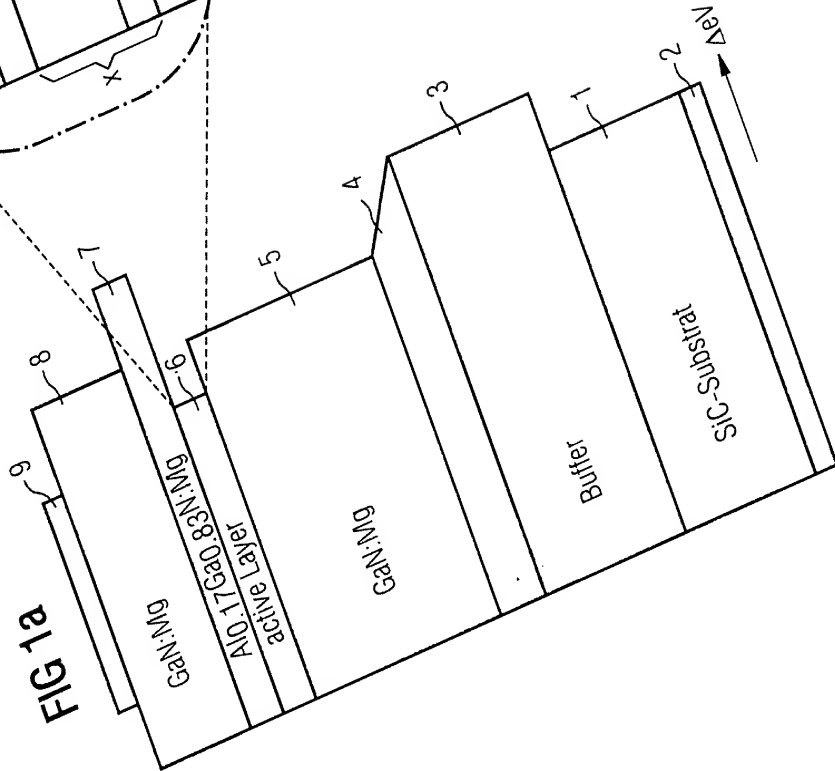
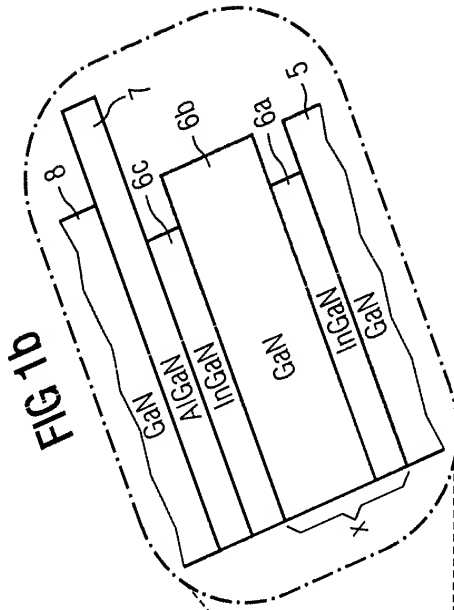


FIG 2

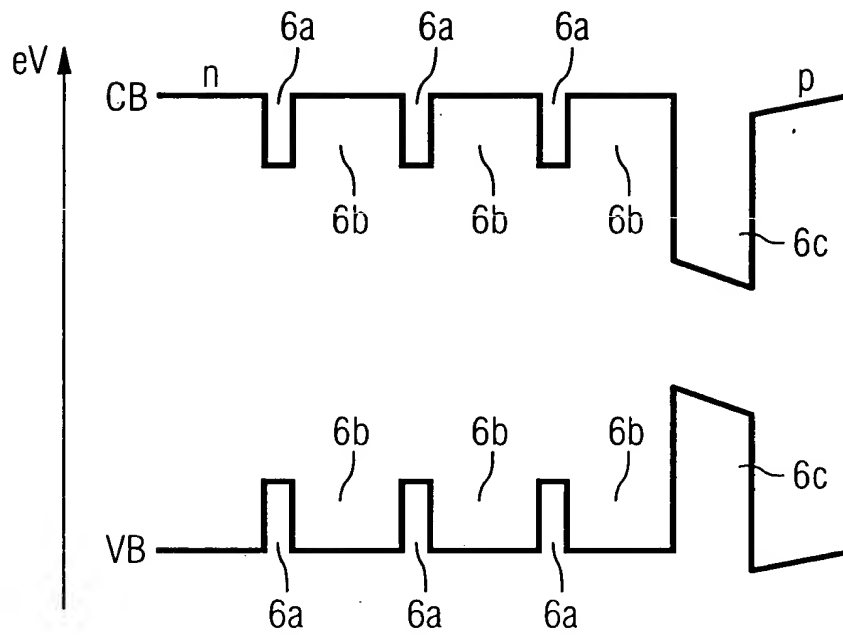


FIG 3

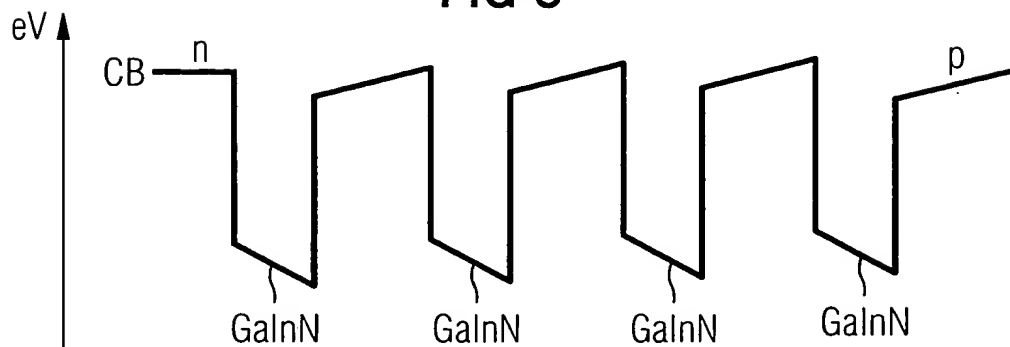


FIG 4

